

補助事業番号 2020M-121
補助事業名 2021年度 絶縁体ナノ試験管を鋳型にした次世代太陽光で発電
料の開発 補助事業
補助事業者名 東京都立大学 理学部 物理学科 ナノ物性研究室 中西勇介

1. 研究の概要

本研究は、従来の太陽光発電の効率限界を打破する次世代の光発電材料の創出を目指すものである。具体的には、絶縁体の空隙を鋳型(テンプレート)に用いることによって、新しい動作原理に基づく高い発電効率が期待されるナノチューブ状の人工鉱物を精密合成し、その光物性を実証する。

2. 研究の目的と背景

本研究の目的は、量子力学に基づく新原理の光発電材料「遷移金属カルコゲナイド(TMC)・ナノチューブ」の創出である。未踏物質であるナノチューブの合成法を確立するとともに、未知の構造・性質・機能を解明することで発電機構を根本的に理解し、従来の太陽電池の理論限界を打破する超高効率な次世代型太陽電池開発の基礎を構築する。

地球温暖化や化石燃料の枯渇が地球規模の問題として議論される中で、クリーンで持続可能なエネルギーである太陽光発電の需要が高まっている。従来の太陽電池は2種類のシリコン材料を貼り合わせた「pn 接合」で構成されている。その研究は進展著しく、発電効率はすでに理論限界である 33%に近づいており、これ以上の劇的な効率向上は困難である。そのため、pn 接合の限界を超える新物質の登場が望まれている。ごく最近、遷移金属カルコゲナイド(TMC: Transition Metal Chalcogenide)のナノチューブで pn 接合の発電限界に縛られない巨大な光発電効果が報告された(Y. Zhang et al., *Nature* 2019)。結晶中の電子の濃淡(分極)に由来するこの現象は現時点では未解明な点も多いが、層が薄く、細い TMC ナノチューブほど高い発電効率が確認された。

すなわち、究極的に細い単層 TMC ナノチューブの発電効率が最も高く、従来の限界を超えた太陽電池の実現が期待されている。しかし、単層 TMC ナノチューブは不安定で、いまだ合成が達成されていなかった。

3. 研究内容 (<http://naka24ysk.jp/wp/ja/researchjp/>)

このような背景のもと、本研究では窒化ホウ素(BN)ナノチューブを用いた独自のアプローチによる研究を展開する。BNナノチューブはカーボンナノチューブと同じ筒状のナノ物質であり、直径1～数ナノメートルの内部空間では原子配列の精密制御が可能である。熱的・化学的安定性の高いBNナノチューブは大気下で900 ° Cの化学反応にも耐えうる堅牢な内壁をもち、結晶成長に適したテンプレートであると同時に不安定な原子細線の保護膜としても機能する(図1)。また、わずか数層の軽原子(BとN)からなる内壁は電子線に対して透明で、電子顕微鏡による内部の直接観察が可能である。そのうえ6 eVもの巨大なバンドギャップをもつ絶縁膜は、金属・半導体であるカーボンナノチューブと違って内包物の電子に影響しないため、原子細線の光学・電気特性の計測、機能開拓が可能になる(図2)。本研究ではBNナノチューブをテンプレートとして用いることにより単層TMCナノチューブを合成し、その構造と光物性の相関を解明することにより、謎に包まれたTMCナノチューブの発電原理の解明とデバイスへの応用を目指すものである。

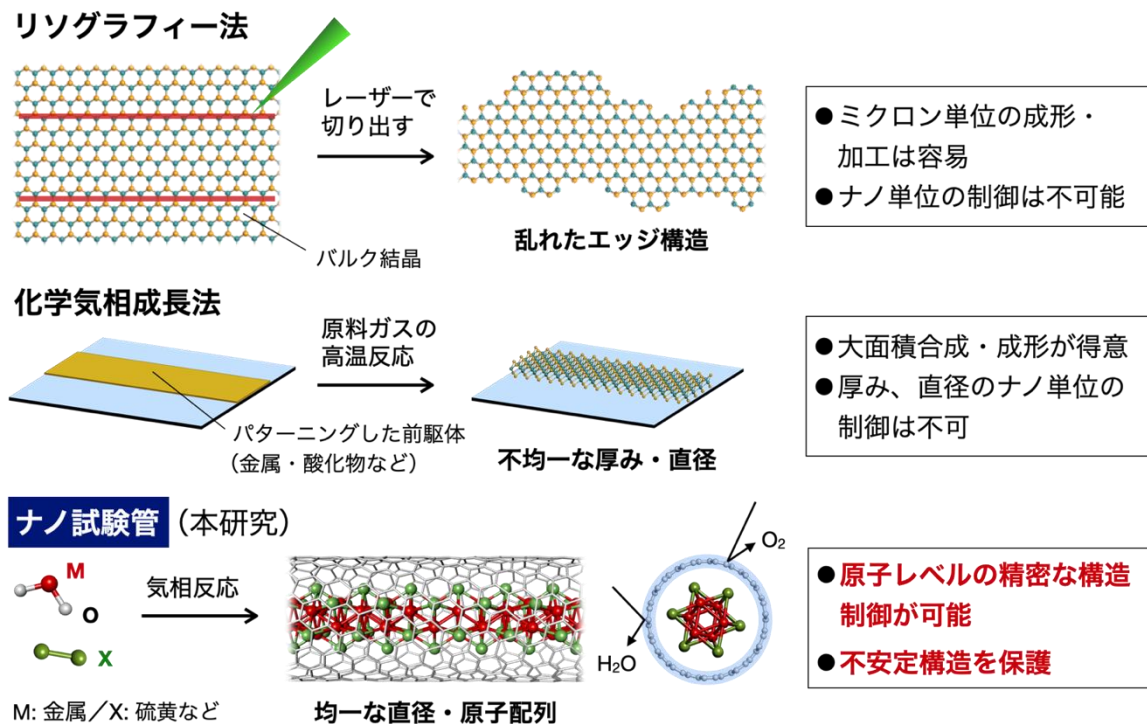


図1 従来の合成法と本研究のアプローチとの比較.

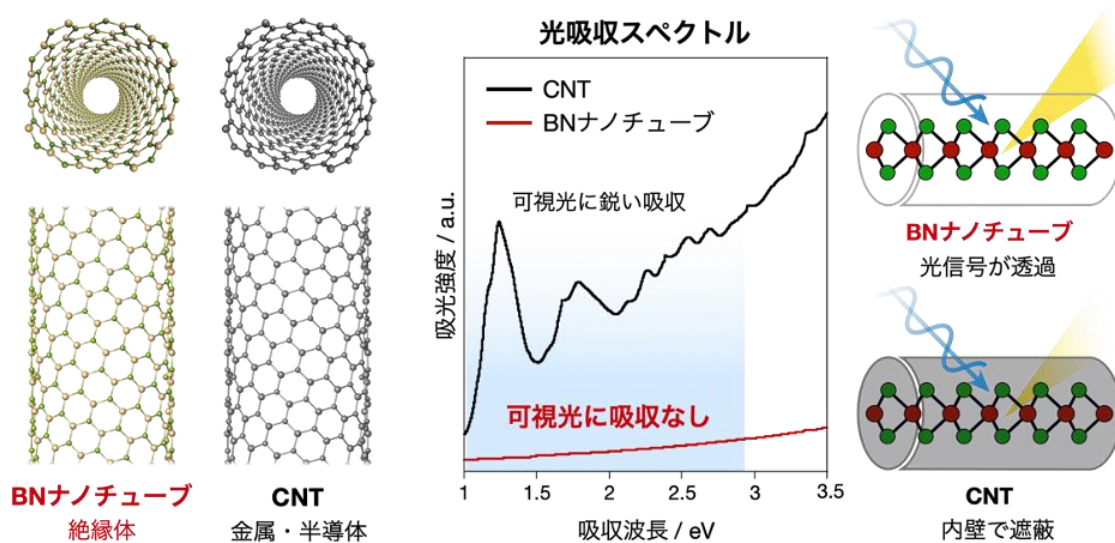


図 2 BN ナノチューブの絶縁性. カーボンナノチューブ (CNT) と違い、可視光領域に吸収がないので原子細線の光信号を計測・活用できる。

具体的には、以下の研究成果が得られた。BNナノチューブの内部で結晶成長を行うことにより、 MoS_2 などのTMCナノチューブの合成に成功した。さらに、電子線分光や光吸収分光によってこれらの一次元物質の電子状態が同じ組成の三次元結晶や二次元薄膜とは異なることを実証した(図3)。すでにさまざまな構造・形状のTMCナノチューブの合成に成功しており、それぞれの電子状態の計測にも成功している。

またBNナノチューブの内部だけではなく、外壁を覆うように MoS_2 ナノチューブを成長させることにも成功した(図4)。BNの表面に合成したことにより MoS_2 ナノチューブに電極を直接接続できるため、光電変換の実証実験が容易になる。

今後さらに研究を進め、光応答の構造・直径依存性、異方性の解明研究に取り組む。また、研究の過程でナノチューブ以外にもナノリボン(短冊)やナノワイヤー(細線)状の化合物の合成にも成功した。

これらの化合物は構造・組成によってさまざまな光吸収・発光波長をもつ光機能材料や高い電気伝導率をもつ電子材料として機能するため、新たなナノテクノロジー産業の創出につながる可能性がある。

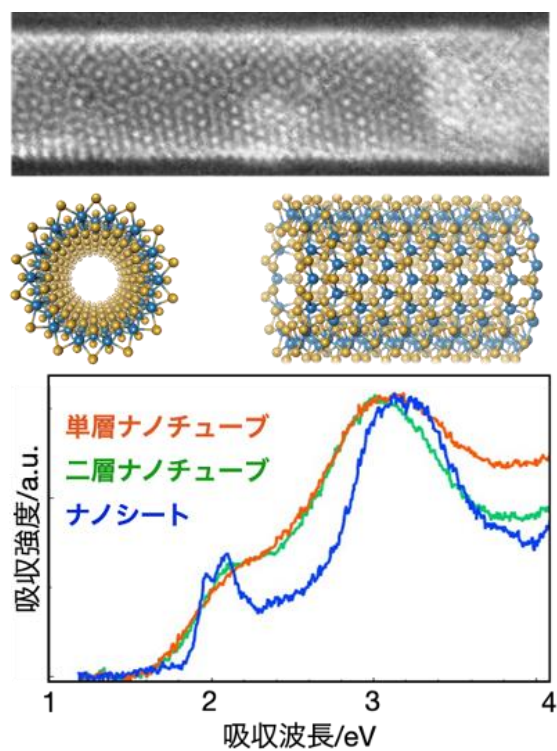


図3 BN ナノチューブ内に形成された世界最細（直径 2.75 nm）の単層 MoS₂ ナノチューブの電顕像と吸収スペクトル.

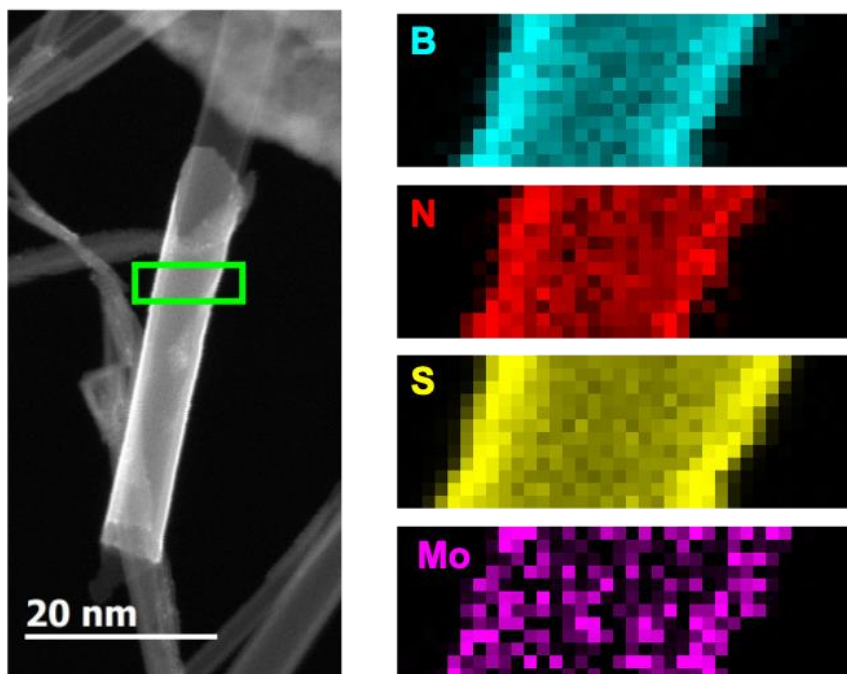


図4 BN ナノチューブの表面に被覆した単層 MoS₂ ナノチューブの電顕像と元素マッピング像.

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本事業で達成された研究成果がさらに進展した場合、実社会に以下の3つの変化が生じることが期待される。

- (1) 太陽光発電の動作原理が刷新され、従来の効率限界を上回る高効率な次世代型太陽電池が誕生する。
- (2) 多くの研究者、エンジニアの興味をひき、世界規模の大きな研究の潮流が生まれ、競争の中で発電効率がさらに向上する
- (3) 太陽光発電を利用した新たなアプリケーションが提案され、太陽電池の市場が拡大する。

以上の変化によって、太陽電池がいつそう普及することにより化石燃料に依存した現代社会から脱却し、持続可能かつクリーンな社会の実現に近づくことが期待される。

5. 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

申請者はナノ試験管を用いた物質合成を得意とし、ダイヤモンドナノワイヤーや遷移金属ナノワイヤーなどの世界初となる新物質の合成に成功してきた(*Nano Lett.* 2019, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015 など)。これまでは新物質の合成と構造解析に注力してきたが、本研究ではその経験と知見を活かし、物性研究、機能開拓に挑戦したものである。ナノワイヤーやナノチューブなどの「原子細線」の研究は世界的にも盛んだが、精密な構造制御が難しく、本来の優れた物性・機能を発揮することは難しい。申請者独自の鑄造技術を活用することにより原子レベルで精密な材料を製作し、理論値に近い物性値を引き出すことができる。原子細線の精密合成から構造解析、物性計測まで一貫して取り組んだ本研究は原子細線の物性研究、機能開発のマイルストーンになりえる。

6. 本研究にかかわる知財・発表論文等

1. T. Takahashi, C. Ando, M. Saito, Y. Miyata, *Y. Nakanishi, *J. Pu, and *T. Takenobu, “Three-dimensional networks of superconducting NbSe₂ flakes with nearly isotropic large upper critical field” *npj 2D Mater. Appl.* **5**, 31 (2021)
2. H. E. Lim, Y. Nakanishi, Z. Liu, J. Pu, M. Maruyama, T. Endo, C. Ando, H. Shimizu, K. Yanagi, S. Okada, T. Takenobu, and *Y. Miyata, “Wafer-scale growth of one-dimensional transition-metal telluride nanowires” *Nano Lett.* **21**, 243 (2021)
3. N. Kanda, *Y. Nakanishi, D. Liu, Z. Liu, T. Inoue, Y. Miyata, D. Tománek, and H. Shinohara, “Efficient growth and characterization of one-dimensional transition metal tellurides inside carbon nanotubes” *Nanoscale* **12**, 17185 (2020)(表紙掲載)

7. 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

なし

8. 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 東京都立大学理学部（トウキョウトリツダイガクリガクブ）

住 所： 〒192-0397 東京都八王子市南大沢1

担 当 者： 助教 中西勇介（ナカニシユウスケ）

担当部署： 物理学科（ブツリガッカ）

E - m a i l: naka24ysk@tmu.ac.jp

U R L: <http://naka24ysk.jp/wp/>